УДК 621.317.7

В.П. Куценко, М.Ф. Трегубов
Науково-виробниче підприємство «Кварсит»,
Укроборонпром, м. Костянтинівка, Україна
Україна, 85104, м. Костянтинівка, Донецької обл., вул. Шмідта, 20

Радіометричний НВЧ-контроль виробів з діелектричних матеріалів

V.P. Kutsenko, M.F. Tregubov
Scientific production enterprise of "Kvarsit",
Ukroboronprom, Konstantinovka, Ukraine
Ukraine, 85104, Konstantinovka, Donetsk obl., Shmidta st, 20

Aerophare UHF Control of Wares Made of Dielectric Materials

В.П. Куценко, Н.Ф. Трегубов
Научно-производственное предприятие «Кварсит»,
Укроборонпром, г. Константиновка, Украина
Украина, 85104, г. Константиновка, Донецкой обл., ул. Шмидта, 20

Радиометрический СВЧ-контроль изделий из диэлектрических материалов

Запропонована система неруйнівного радіотеплового і радарного методів контролю технологічних параметрів термостійких виробів із ситалів, ситалової та кварцової кераміки на робочому місці. Розроблено механізм зняття і обробки інформації про контрольовані параметри діелектричних виробів, що дозволяють забезпечити необхідну вірогідність контролю.
Ключові слова: радіометрія, неруйнівний контроль, діелектричні матеріали, електромагнітне випромінювання, радіотеплове випромінювання, вимірювання, властивості об'єктів.

The system of non-destructive radiothermal and radar methods for control of technological parameters of heat-resistant wares made of vitro and quartz ceramics at the workplace is offered. The mechanism of removal and treatment of information about the controlled parameters of dielectric wares allowing to provide necessary authenticity of control is developed.
Key Words: radiometry, non-destructive control, dielectric materials, electromagnetic radiation, radiothermal radiation, measuring, properties of objects.

Предлагается система неразрушающего радиотеплового и радарного методов контроля технологических параметров термостойких изделий из ситаллов, ситалловой и кварцевой керамики на рабочем месте. Разработан механизм снятия и обработки информации о контролируемых параметрах диэлектрических изделий, позволяющий обеспечить необходимую достоверность контроля.
Ключевые слова: радиометрия, неразрушающий контроль, диэлектрические материалы, электромагнитное излучение, радиотепловое излучение, измерение, свойства объектов.

Вступ

У сучасному літакобудуванні широко використовуються вироби з діелектричних матеріалів, до яких пред'являються високі вимоги щодо міцності, термостійкості, радіопрозорості та інших параметрів. Однак внутрішні неоднорідності матеріалів, приховані дефекти (повітряні пузирі, розшарування, тріщини, домішки) можуть приз-

вести до позаштатних ситуацій під час експлуатації техніки. Для забезпечення якості даної продукції у період виробництва використовують методи технологічного контролю із застосуванням ультразвукового, рентгенівського та ін. досліджень.

Останніми роками все більша увага приділяється неруйнівним радіохвильовим методам контролю [1]. За рівнем потужності власного радіотеплового випромінювання або сигналу зовнішнього випромінювання, що проходить через досліджуваний матеріал (радарний метод), можна контролювати вироби безпосередньо на робочому місці, що створює переваги даним методам контролю [2], [3]. Реалізація радіохвильових методів здійснюється високочутливими приймальними системами надвисокочастотного (НВЧ) або надзвичайно високочастотного (НЗВЧ) діапазону, побудованими за принципом радіометрів [4].

У той же час, незважаючи на перспективність подібної апаратури, сьогодні радіохвильові методи ще недостатньо використовуються в технологічних процесах для контролю складу і властивостей діелектричних виробів. Так, наприклад, при контролі технологічних параметрів ситалів, ситалової і кварцової кераміки, з яких виготовляють термостійкі елементи літальних апаратів, використовується вибірковий контроль та руйнівний метод хіміко-механічного дослідження.

Постановка задачі дослідження. Метою даної роботи є розробка системи технологічного неруйнівного контролю виробів із ситалів, ситалової і кварцової кераміки із застосуванням власних радіотеплових і зовнішніх радіохвильових сигналів для забезпечення у процесі виробництва повторюваності їхніх технологічних параметрів.

Основна частина

Розвиток елементної бази техніки дозволяє сьогодні розробляти системи неруйнівного радіотеплового і радарного контролю радіопрозорих виробів з діелектричних матеріалів, які здатні забезпечити підвищення якості та надійності продукції і рентабельності виробництва. Застосування даного виду контролю в процесі виробництва може забезпечити якісне дослідження ста відсотків виробів у технологічному циклі виготовлення і виключає необхідність їхнього руйнування при вибірковому контролі.

На рис. 1 наведена система неруйнівного радіотеплового і радарного контролю технологічних параметрів виготовлених виробів із ситалів, ситалової і кварцової кераміки безпосередньо на робочому місці [5].

Система контролю включає такі елементи: приймальна НВЧ-антена 1 підключена до першого входу НВЧ-перемикача 3, до другого входу якого підключений еквівалентний опір 4, до виходу НВЧ-перемикача 3 послідовно підключені кодокерований атенюатор 7, НВЧ-змішувач 8 з кодокерованим НВЧ-гетеродином 9, підсилювач проміжної частоти 10, квадратичний детектор 11, підсилювач низької частоти 12, синхронний детектор 13, фільтр нижніх частот 14, аналого-цифровий перетворювач 15 і мікроЕОМ 18. МікроЕОМ 18 через подільник частоти 16 з'єднана із синхронним детектором 13 і керувальним входом НВЧ-перемикача 3, а через кодокеровані ланцюги – з кодокерованим НВЧ-генератором 6, послідовно з'єднаним з кодокерованим атенюатором 5, до виходу якого підключена випромінювальна НВЧ-антена 2, кодокерованим блоком регулювання 19, кодокерованим атенюатором 7, кодокерованим НВЧ-гетеродином 9 і цифровим індикатором 17. Система має флуктуаційний поріг чутливості $10^{-14}...10^{-15}$ Вт [6], [7].

Контроль здійснюється у НЗВЧ-діапазоні, оскільки при цьому збільшується розрізнювальна здатність системи. Обертання виробу і синхронне переміщення антен

здійснюється за програмою випробувань кодокерованим блоком регулювання 19. При контролі враховується, що товщина стінок виробів та їхній хімічний склад є константою.

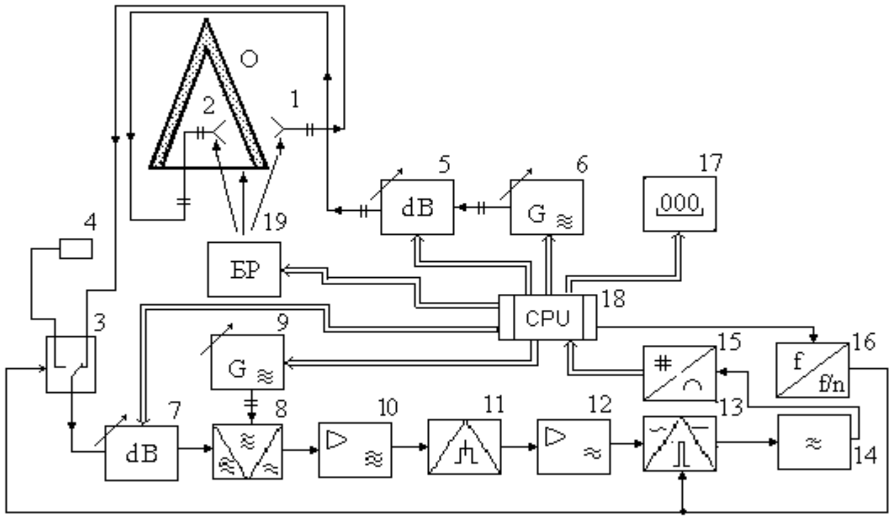


Рисунок 1 – Система неруйнівного контролю виробів з діелектричних матеріалів

Система неруйнівного радіометричного контролю працює у двох режимах: режимі вимірювання, що заснований на радарному принципі, і режимі вимірювання власного радіотеплового випромінювання матеріалу виробу «О», нагрітого до заданої температури.

У першому режимі кодокерований НВЧ-генератор 6 формує монохроматичний сигнал необхідної частоти

$$U_G(t) = U_G \cos(\omega\ t + \varphi\ )\,, \quad (1)$$

де U_G – амплітуда монохроматичних коливань кодокерованого НВЧ-генератора 6; ω – частота монохроматичних коливань кодокерованого НВЧ-генератора 6; φ – фаза монохроматичних коливань кодокерованого НВЧ-генератора 6 ; t – час,

який через кодокерований атенюатор 5 надходить на випромінювальну НВЧ-антену 2 і випромінюється на досліджувану зону виробу «О» з потужністю

$$P_1 = KSU_G^{\,2}\,, \quad (2)$$

де K – первісний коефіцієнт загасання, установлюваний на атенюаторі 5; S – крутість перетворення випромінювальної НВЧ-антени 2.

У сигналу, що пройшов через матеріал виробу «О», змінюються такі параметри, як коефіцієнти проходження (передачі), поглинання і відбиття, діаграма розсіювання, фазовий зсув, вид і площина поляризації. Зміни цих величин при проходженні НВЧ-сигналу через контрольований виріб характеризують внутрішній стан виробу «О», зокрема наявність різних дефектів (розшарування, пористість, тріщини, сторонні включення, порушення структури та ін.).

Тому у системі контролю при оцінці рівня інтенсивності випромінювань, що пройшли через матеріал виробу «О», використовуються коефіцієнт поглинання (загасання). Цей коефіцієнт пов’язаний з діелектричною проникністю і товщиною стінки контрольованого виробу. Тому залежно від цих параметрів, а так само від задання за параметрами дефектів, що виявляються, установлюється необхідна частота монохроматичного сигналу і первісний коефіцієнт заглушення сигналу в кодокерованому атенюаторі 5. Оптимальний режим роботи контролюючої системи визначається мікроЕОМ 18 за встановленою програмою дефектоскопії технологічних параметрів радіопрозорих виробів у радарному режимі контролю.

Сигнал, що пройшов через матеріал виробу «О», приймається НВЧ-антеною 1 радіометричного приладу контролю (РПК) і надходить на одне плече НВЧ-перемикача 3, до іншого плеча, для компенсації власних шумів антени, підключений її еквівалент. З виходу НВЧ-перемикача 3 сигнал через кодокерований атенюатор 7 надходить на вхід НВЧ-змішувача 8, а на другий його вхід подається сигнал від кодокерованого НВЧ-гетеродина 9. У результаті змішування сигналів утворюються коливання різницевої проміжної частоти, які підсилюються підсилювачем проміжної частоти 10, детектуються квадратичним детектором 11, підсилюються за низькою частотою підсилювачем 12 і детектуються синхронним детектором 13. Вихідна напруга з фільтра нижніх частот 14 надходить на АЦП 15, а потім на мікроЕОМ 18, де здійснюється нагромадження і обробка вимірюваної інформації та виведення її на цифровий індикатор. Одночасно з виходу мікроЕОМ 18 за певною програмою подаються кодовані сигнали керування, які перетворюються в пропорційні вихідні напруги. Напруги перебудовують частоту НВЧ-генератора 6 і кодокерованого НВЧ-гетеродина 9, рівень заглушення сигналу в кодокерованих атенюаторах 5 і 7, а також через блок регулювання 19 забезпечують обертовий рух виробу «О» із кроком Δl і синхронне переміщення антен 1 і 2 по вертикалі із кроком Δh, забезпечуючи задавану точність виміру.

Якщо в зоні контролю буде перебувати стороннє включення або буде інша густина матеріалу, то частина енергії буде розсіюватися на ньому і це буде зареєстровано РПК. Сигнал на виході з матеріалу буде мати потужність:

$$P_1 = KSK_1U_G^2, \tag{3}$$

де K_1 – коефіцієнт поглинання матеріалу виробу «О» в зоні контролю.

Якщо рівень сигналу буде відрізнятися від еталонного значення, що уведено в мікроЕОМ 18, то буде подана команда на зміну значення загасання кодокерованого атенюатора 5 до реєстрації на цифровому індикаторі 17 значення, що відповідає еталонному. Величина зміни значення коефіцієнта загасання кодокерованого атенюатора 5 і координати зони вимірювання запам’ятовуються мікроЕОМ 18. За результатами проведених вимірювань із заданим кроком будується графік коефіцієнтів поглинання матеріалу по всій поверхні виробу «О».

Потім система в автоматичному режимі переходить до другого режиму вимірювання. МікроЕОМ 18 через блок керування 19 нагріває матеріал виробу «О» до заданої в програмі температури і підтримує її стабільність по всій поверхні матеріалу протягом усього другого режиму вимірювань. Радіотеплові випромінювання будуть визначатися складом і властивостями матеріалу виробу «О». Дисперсія вхідного радіотеплового сигналу НВЧ-антени 1, що формується бездефектним матеріалом виробу «О», буде:

$$\overline{U_0}^2 = \beta S_1 k T_0 \Delta f\ , \tag{4}$$

а дисперсія сигналу від дефектної ділянки матеріалу складе:

$$\overline{U}_{0'}^2 = \beta S_1 k T_o (1-\gamma)\Delta f\ , \tag{5}$$

де S_1 – чутливість НВЧ-антени 1; β – коефіцієнт, що залежить від випромінювальної здатності матеріалу виробу «О»; k – стала Больцмана; T_O – температура матеріалу виробу «О»; Δf_1 – смуга частот високочастотної частини РПК; γ – коефіцієнт ослаблення електромагнітного випромінювання, що залежить від розмірів і глибини розташування неоднорідності у матеріалі виробу «О».

Потужність власних радіотеплових випромінювань матеріалу виробу «О» в НВЧ-діапазоні дуже мала і порівнянна з рівнем потужності власних шумів приймальної НВЧ-антени 1. Ці сигнали між собою некорельовані. Тому дисперсію вихідного сигналу антени можна представити у вигляді суми двох дисперсій:

$$\overline{U}_1^2 = \overline{U}^2 + \overline{U}_{Ш1}^2, \tag{6}$$

де $\overline{U}_1^2$ – дисперсія вихідного сигналу НВЧ-антени 1 в смузі прийому РПК; $\overline{U}^2$ – дисперсія прийнятого радіовипромінювання; $\overline{U}_{Ш1}^2$ – дисперсія власних шумів НВЧ-антени 1.

Еквівалент антени 4 має опір і шуми, рівні опору і шумам НВЧ-антени 1. Тому дисперсію вихідного сигналу еквівалента 4 виразимо через дисперсію сигналу НВЧ-антени 1:

$$\overline{U}_E^2 = \overline{U}_{Ш1}^2, \tag{7}$$

де $\overline{U}_E^2$ – дисперсія шумів еквівалента антени 4.

При зазначеному положенні НВЧ-перемикача 3 сигнал на виході квадратичного детектора 11 РПК можна представити у вигляді:

$$U_1 = S\left(\overline{U}_E^2 + \overline{U}_{Ш2}^2\right), \tag{8}$$

де S – номінальна крутість перетворення РПК до підсилювача низької частоти 12; $\overline{U}_{Ш2}^2$ – дисперсія власних шумів на вході РПК.

За командою мікроЕОМ 18 НВЧ-перемикач 3 переводиться в протилежне положення. Рівень власних шумів радіоприймального каналу при цьому не змінюється завдяки рівності опорів НВЧ-антени 1 і еквівалента 4. Вихідна напруга квадратичного детектора 11 РПК набуває значення:

$$U_2 = S\left[\left(\overline{U}_X^2 + \overline{U}_{Ш1}^2\right) + \overline{U}_{Ш2}^2\right]. \tag{9}$$

Підсилювачем 12 низької частоти підсилюється змінна складова послідовності відеоімпульсів (6) і (7) з амплітудою:

$$U_3 = K_1 \frac{U_2 - U_1}{2}, \tag{10}$$

де K_1 – коефіцієнт підсилення підсилювача низької частоти 12.

Для бездефектної ділянки матеріалу виробу «О» змінна складова з урахуванням (4) буде:

$$U_3 = K_1 \frac{S\beta S_1 k T_0 \Delta f}{2}, \tag{11}$$

а для дефектної ділянки з урахуванням (5):

$$U_3' = K_1 \frac{S\beta S_1 k T_0 (1-\gamma)\Delta f}{2}. \tag{12}$$

Підсилена змінна напруга U_3 (U_3') випрямляється синхронним детектором 13, що керується низькочастотною напругою від мікроЕОМ 18. Випрямлена напруга згладжує-

ться фільтром нижніх частот Z1 і фіксується цифровим індикатором 17. Якщо значення вихідного сигналу відрізняється від еталонного, то на кодокерований атенюатор 7 подається керувальний сигнал, що змінює його загасання до величини, відповідної еталонному значенню сигналу. Проведені за програмою вимірювання фіксуються в пам’яті мікроЕОМ 18 і також будується графік. Отримані результати при першому і другому режимах роботи системи порівнюються між собою і з еталонними показниками і робиться висновок про придатність обтічника.

Дослідження і комп’ютерне моделювання показали, що розроблена система неруйнівного радіометричного контролю радіопрозорих виробів «О» на робочому місці дозволяє в радарному режимі виявляти локальні неоднорідності, ефективний діаметр яких $d_{еф} = 0{,}2\ \lambda_0$ (λ_0 – довжина хвилі НВЧ випромінювання, що використовується при дослідженні виробу), а також розшарування із розкриттям порядку 0,03 λ_0. При радіотепловому режимі можливо виявлення і оцінка локальних неоднорідностей, які викликають ослаблення власного радіотеплового випромінювання в діапазоні НВЧ починаючи з $\gamma = 10^{-4}...5\cdot10^{-4}$. Точність реєстрування змін сигналу ±0,02 дБ. Система неруйнівного радіометричного контролю радіопрозорих виробів на робочому місці дозволяє значно знизити рівні монохроматичних опромінювальних сигналів до $10^{-12}...10^{-14}$ Вт у діапазоні частот 48 – 73 ГГц.

Похибка, обумовлена відбиттям електромагнітних хвиль діелектричним матеріалом виробу і установленням просторових стоячих хвиль, нівелюється за рахунок вимірювання в рівних умовах як еталонного зразка, так і контрольованого виробу. Зменшення випадкових похибок досягається проведенням багаторазових вимірювань та стандартною обробкою отриманих результатів.

Нижче наведені результати досліджень ряду матеріалів з використанням запропонованої методики та розробленої вимірювальної установки: 1-й, 2-й і 5-й зразки – ситали кристалізовані, 3-й і 4-й зразки – ситали некристалізовані, 6-й зразок – ситалокераміка.

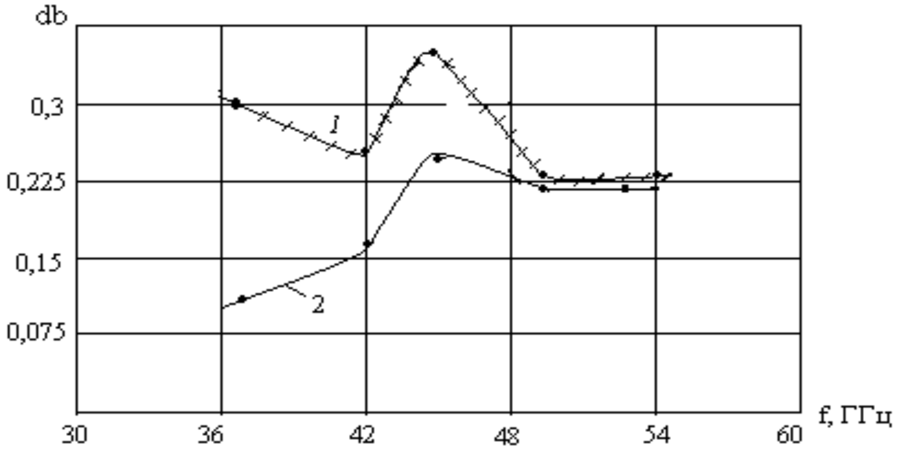


Рисунок 2 – Залежність питомих поглинальних властивостей ситалів у діапазоні 37 – 53 ГГц

Дослідження радарним методом питомих поглинальних властивостей ситалів 1 і 2 у діапазоні 37 – 53 ГГц за температури 24°С наведені на рис. 2.

З графіка (рис. 2) видно, що ситали 1 і 2 мають максимальне питоме поглинання на частоті 45 ГГц. У цілому поглинальні властивості ситалів на цих частотах мають нелінійний характер, що необхідно враховувати при оцінці їх радіопрозорості.

При дослідженні радарним методом питомого поглинання різними зразками ситалів на частоті 52 ГГц за температури 24°С отримана наступна залежність (рис. 3).

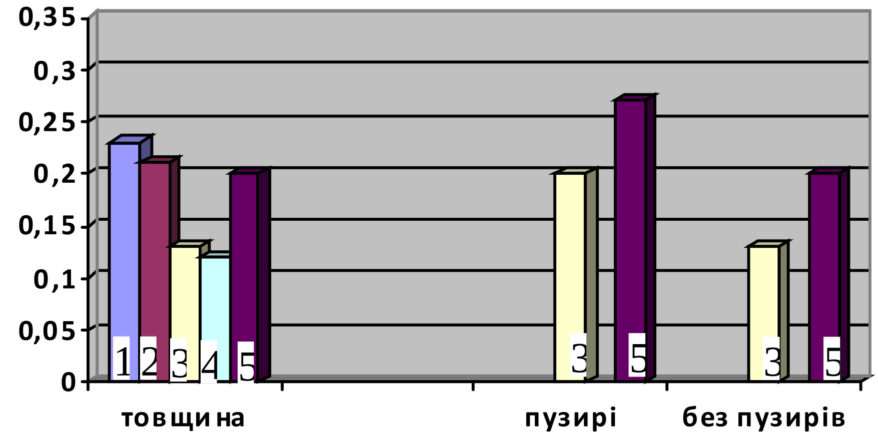


Рисунок 3 – Залежність питомого поглинання ситалами електромагнітного випромінювання частотою 52 ГГц

З діаграми (рис. 3) видно, що найбільше питоме поглинання сигналу в ситалі 1, середнє – у ситалів 2 і 5 і найменше – у ситалів 3 і 4. Це вказує на те, що кристалізація ситалів збільшує їхні поглинальні властивості. У зоні повітряних пузирів також поглинання сигналу вище, ніж в однорідному матеріалі. Вимірювання показали, що реєструються пузирі розміром порядку λ/4 (де λ – длина електромагнітної хвилі випромінювання).

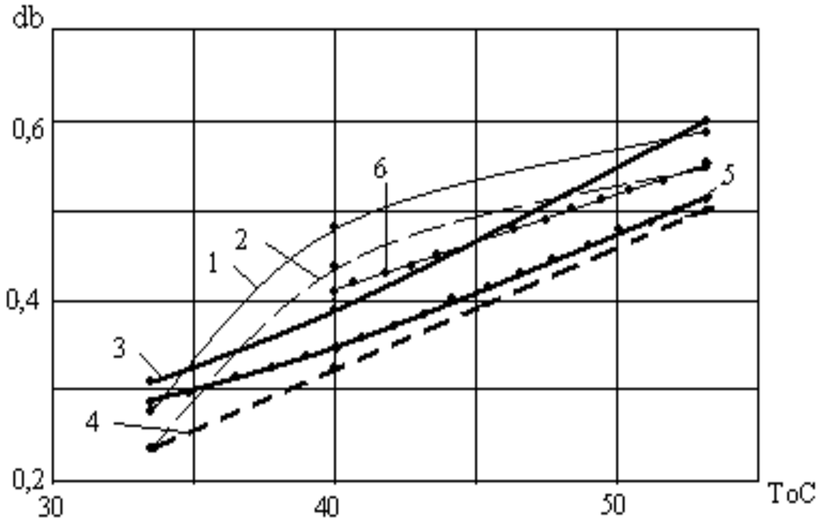


Рисунок 4 – Залежність питомого рівня радіотеплового випромінювання ситалів від температури в діапазоні 30 – 60°С

Проведені дослідження власного радіотеплового випромінювання різних зразків ситалів на частоті 52 ГГц в діапазоні температур 33 – 53°С підтверджують залежності, отримані радарним методом (рис. 4).

Графіки (рис. 4) показують зміни нелінійності інтенсивностей радіотеплових випромінювань різних ситалів, а отже, і їхніх радіопоглинальних властивостей. При цьому в кристалізованих ситалах рівень радіотеплового випромінювання вищий, ніж у некристалізованих, переробка некристалізованих ситалів у ситало-кераміку приводить до зростання її радіотеплових властивостей.

Аналіз проведених досліджень показує, що розроблена система технологічного неруйнівного контролю виробів із ситалів, ситалової і кварцової кераміки із застосуванням власних радіотеплових і зовнішніх радіохвильових сигналів дозволяє реєструвати дефекти структури виробів, зміни складу зазначених матеріалів та їхніх властивостей, що виникають при їх технологічній обробці. Результати вимірювань, проведені радіотепловим і радарним методами, корелюють між собою і сприяють підвищенню вірогідності контролю.

Висновки

Запропонована авторами радіометрична система контролю виробів з діелектричних матеріалів (ситали, ситалова і кварцова кераміки) чутлива до змін складу та властивостей матеріалів.

Результати вимірювань, проведені радіотепловим і радарним методами, корелюють між собою і сприяють підвищенню вірогідності контролю.

Дана система може бути використана для неруйнівного контролю технологічних параметрів виробів із вказаних діелектричних матеріалів, що буде сприяти підвищенню рентабельності виробництва.

Література

1. Куценко В.П. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Трегубов Н.Ф., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф. – Донецк : ІПШІ «Наука і освіта», 2011. – 324 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник : в 2 кн. / под ред. В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1976. Кн. 1. – 396 с.
3. Головко Д.Б. Сверхвысокочастотные методы и средства измерения физических величин : учебное пособие / Головко Д.Б., Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. – К. : Лебедь, 2003. – С. 72-74.
4. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.П., Куценко В.П., Гимпилевич Ю.Б. – Житомир : Волынь, 2003. – 408 с.
5. Куценко В.П. Радиоволновой контроль изделий из диэлектрических материалов / В.П. Куценко, М.Ф. Трегубов // Материалы 17-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Крымико-2007). – Севастополь : «Вебер», 2007. – С. 733-734.
6. Патент на корисну модель № 18320 (Україна). Спосіб вимірювання енергетичного спектра слабких радіовипромінювань / Куценко В.П., Скрипник Ю.О., Трегубов М.Ф., Шевченко К.Л., Яненко О.П. – № u200603339; Заявл. 28.03.2006; Опубл. 15.11.2006; Бюл. № 11.
7. Радиометрический способ неразрушающего контроля состава и свойств диэлектрических материалов / В.П. Куценко, Ю.О. Скрипник, М.Ф. Трегубов, К.Л. Шевченко, О.П. Яненко // Материалы 16-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Крымико-2006). – Севастополь : «Вебер», 2006. – С. 762-764.

Literatura

1. Kucenko V.P. Metody i sredstva sverhvysokochastotnoj radiometrii. Doneck: IPShI "Nauka i osvita". 2011. 324s.
2. Pribory dlja nerazrushajushhego kontrolja materialov i izdelij: Spravochnik. V 2-h kn. Pod red. V. V. Kljueva. Kn.1. M.: Mashinostroenie. 1976. 396 s.
3. Golovko D.B. Sverhvysokochastotnye metody i sredstva izmerenija fizicheskih velichin: Uchebnoe posobie. K.: Lebed'. 2003. S. 72-74.
4. Skripnik Ju.A. Mikrovolnovaja radiometrija fizicheskih i biologicheskih ob'ektov. Zhitomir: Volyn'. 2003. 408 s.
5. Kucenko V.P. Materialy 17-oj mezhdunarodnoj konferencii "SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii" (Krymiko-2007). Sevastopol': Veber. 2007. S. 733-734.
6. Patent na korysnu model' №18320 (Ukraina),. Sposib vymirjuvannja energetychnogo spektra slabkih radioviprominjuvan'. Kucenko V.P., Skripnik Ju.O., Tregubov M.F., Shevchenko K.L., Janenko O.P. № u200603339; Zajavl. 28.03.2006; Opubl. 15.11.2006; Bjul. № 11.
7. Kucenko V.P. Materialy 16-oj mezhdunarodnoj konferencii "SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii" (Krymiko-2006). Sevastopol': Veber. 2006. S. 762-764.

RESUME

V.P. Kutsenko, N.F. Tregubov

Aerophare UHF Control of Wares Made of Dielectric Materials

In the modern aircraft construction, wares made of dielectric materials, which made great demands in relation to durability, heat-resistance, radiotransparency and other parameters to, are widely used. However, internal heterogeneity of materials, latent defects can result in supernumerary situations during exploitation of technique. For providing quality of this products in the period of production the non-destructive methods of radio wave technological control can be used.

The system of non-destructive radiothermal and radar methods for control of technological parameters of heat-resistant wares made of vitro and quartz ceramics at the workplace is offered. It works in two modes: measuring mode, which is based on radar principle, and mode of measuring of own radiothermal radiation of material of good, heated to the set temperature.

The mechanism of removal and treatment of information about the controlled parameters of dielectric wares allowing to provide necessary authenticity of control is developed.

This system can be in-use for research of technological parameters of wares made of indicated dielectric materials without their destruction which will be instrumental in the increase of profitability of production.

Стаття надійшла до редакції 05.06.2012.